

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБАСТНЫХ БАЗ ЗНАНИЙ: СРАВНЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА РАЗНЫХ ТИПАХ РЕГУЛЯТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОПТИМИЗАТОРА БАЗ ЗНАНИЙ**

**Ульянов Сергей Викторович<sup>1</sup>, Нефёдов Никита Юрьевич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Доктор физико-математических наук, профессор;  
ГБОУ ВО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: uyanovsv@mail.ru.*

<sup>2</sup>*Аспирант;  
ГБОУ ВО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: nefnuket@gmail.com.*

*В статье приводится сравнение управления нечетких регуляторов двух типов управления – управления с помощью нечеткого ПИД-регулятора и нечеткого управления скользящего типа. Сравнение качества управления проведено с помощью моделирования управления неустойчивым динамическим объектом «карусель-маятник» с использованием инструментария оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях.*

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы управления, робастность, мягкие вычисления, база знаний, скользящий режим управления, нечеткая логика, ПИД-регулятор.

## **ROBUST DESIGN TECHNOLOGY OF KNOWLEDGE BASES: COMPARISON OF FUZZY CONTROLLERS FOR DIFFERENT TYPES BY USING SOFT-COMPUTING OPTIMIZER**

**Ulyanov Sergey<sup>1</sup>, Nefedov Nikita<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;  
Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: uyanovsv@mail.ru.*

<sup>2</sup>*PhD Student;  
Dubna International University of Nature, Society and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: nefnuket@gmail.com.*

*The article compares two types of intelligent control – control with a hybrid fuzzy PID-controller and fuzzy sliding type of control. The comparison of control quality by simulation of dynamic unstable control object «cart-pole» using soft-computing optimizer based on soft computing is showed.*

**Keywords:** intelligent control systems, robustness, soft computing, knowledge base, sliding mode control, fuzzy logic, PID.

**Введение**

Известно, что при исследовании процессов управления сложных и слабоструктурированных динамических систем в условиях неопределенности, применение методов, базирующихся на использовании точных математических моделей, не позволяет построить адекватные модели и алгоритмы, позволяющих достигнуть оптимального управления. В последнее время, с увеличением сложности задач управления, все большее распространение получают технологии интеллектуального управления. Одним из важнейших направлений в теории интеллектуального управления в течение последних десятилетий является поиск решения проблемы оптимального управления сложными техническими системами в условиях неопределенности и возникновения дефицита или ограниченного полезного ресурса. Одним из самых эффективных методов решения задач в таких условиях является синтез системы с переменной структурой на скользящих режимах (СР).

Исследования в области СР являются одними из наиболее актуальных в настоящее время. Задача синтеза в системах с разрывными управлениями обычно сводится к построению поверхностей переключений в фазовом пространстве, на которых функции управления претерпевают разрывы. При выполнении определенных соотношений, в таких системах на данных поверхностях может возникнуть специфический вид движения – скользящий режим. Подобрать оптимальную структуру поверхности переключения управления является нелегкой задачей, даже для опытного эксперта. Для решения данных проблем были использованы технологии интеллектуальных вычислений, включающих мягкие вычисления с использованием ряда важных термодинамических, информационно-энтропийных и динамических критериев управления [1].

На практике часто для решения подобных задач используется нечеткий регулятор (НР), управляющий коэффициентами усиления ПИД-регулятора. НР осуществляет управление за счет интегрированной в него базы знаний (БЗ), включающей данные о виде и параметрах функций принадлежности входных и выходных нечетких переменных, а также набор нечетких продукционных правил.

Целью данной работы является сравнение качества управления НР на двух разных типах управления с помощью Оптимизатора баз знаний (ОБЗ).

**Система со СР управления**

Динамическое поведение нечеткого регулятора характеризуется множеством лингвистических правил, составленных экспертом. Пользуясь этим множеством, механизм нечеткого вывода выдает соответствующее управляющее воздействие [2]. Для двухмерного случая нечеткое управление может использовать: ошибку  $e$  и скорость изменения ошибки  $\dot{e}$  в виде входных лингвистических переменных нечеткого правила. Таблица нечётких правил приведена ниже [3].

Таблица 1. Нечеткие правила

$\Delta u$	$e$							
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$\dot{e}$	PB	Z	NZ	NS	NM	NB	NB	NB
	PM	PZ	Z	NZ	NS	NM	NB	NB
	PS	PS	PZ	Z	NZ	NS	NM	NB
	Z	PM	PS	PZ	Z	NZ	NS	NM
	NS	PB	PM	PS	PZ	Z	NZ	NS
	NM	PB	PB	PM	PS	PZ	Z	NZ
	NB	PB	PB	PB	PM	PS	PZ	Z

Другой способ рассмотрения правил таблицы – это фазовая траектория, показанная на рис. 1, стрелки показывают направление усиления.

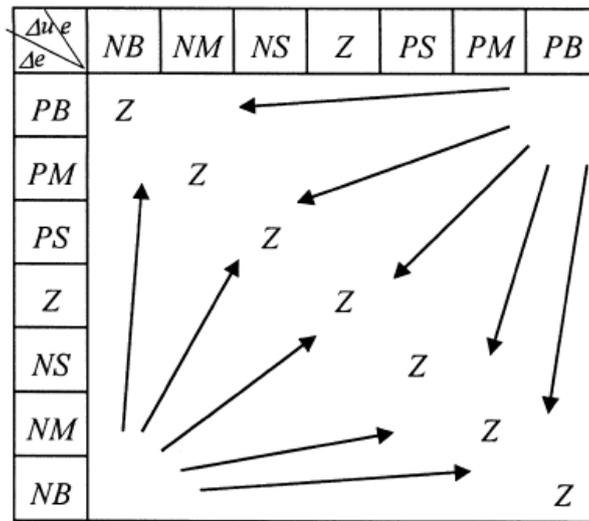


Рис. 1. Фазовая траектория НР

На рис. 1  $Z$  – поверхность переключения. Из табл. 1 можно заключить, что если  $e$  и  $\dot{e}$  близки к поверхности, то нечеткое управляющее воздействие сильное, чем дальше оно от поверхности, тем оно слабее. Поэтому, поверхность скольжения принимает вид:  $s = e + \dot{e}$  (где  $w$  – положительная переменная и определяет скорость сходимости для  $e$  и  $\dot{e}$ ).

### Структура интеллектуальной системы управления (ИСУ) со скользящим режимом

На рис. 2 показана структура ИСУ для регулятора со СР. На вход блока вычислений  $s$  и  $s'$  подается текущая ошибка управления (вычисляется как разность состояния ОУ и задающего сигнала) и скорость ошибки управления, после этого полученные значения поступают на вход НР, который выдает управляющее воздействие на ОУ [4].



Рис. 2. Схема ИСУ

### Структура ИСУ с ПИД-регулятором

На рис. 3 изображена структура ИСУ, где  $x(t)$  – вектор состояния объекта управления (ОУ),  $x_d$  – «задающий сигнал» (цель управления),  $e(t)$  – ошибка управления, вычисляемая как разность состояния ОУ и задающего сигнала:  $e(t) = x_d - x(t)$ . На вход НР подаётся вектор ошибки управления: ошибка управления  $e(t)$ , интегральная ошибка управления  $ie = \int edt$  и производная ошибки управления  $\dot{e}(t)$ .

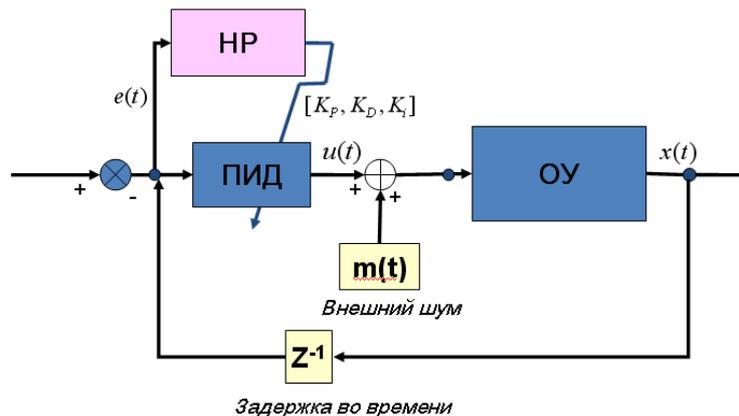


Рис. 3. Структура ИСУ

Структура НР представлена на рис. 4.

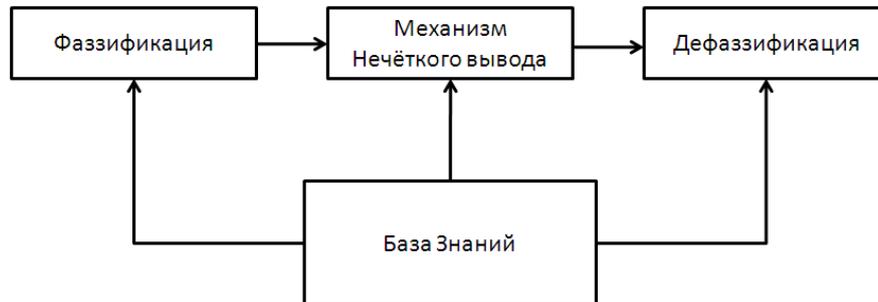


Рис. 4. Структура НР

НР состоит из следующих блоков:

- База Знаний, включающая базу нечетких правил и базу данных.
- База нечетких правил состоит из множества правил типа «если – то». База данных содержит информацию о типах и параметрах функций принадлежности, используемых в нечетких правилах.
- Механизм нечеткого вывода.
- Блоки фазификации и дефазификации. Блок фазификации преобразует входное, точное, значение в нечеткое значение. Блок дефазификации, наоборот, преобразует значения нечеткого множества в выходное, четкое значение.

Выходом НР является вектор значений коэффициентов усиления, которые поступают в ПИД-регулятор для формирования управляющего воздействия:

$$u(t) = K_p(t)e(t) + K_I(t) \int_0^t e dt + K_D(t)\dot{e}(t) \tag{1}$$

Таким образом, функционирование ОУ существенным образом зависит от выбранных коэффициентов ПИД-регулятора. Поэтому, для разработчиков системы управления становится весьма актуальной проблема эффективного способа выбора этих параметров для обеспечения высокого качества управления [5].

Рассмотрим технологию получения БЗ с помощью инструментария ОБЗ для двух типов управления.

### Математическая модель системы

В качестве примера применения ОБЗ рассмотрим задачу управления неустойчивой динамической системой «движущаяся каретка – перевернутый маятник» (рис. 5).

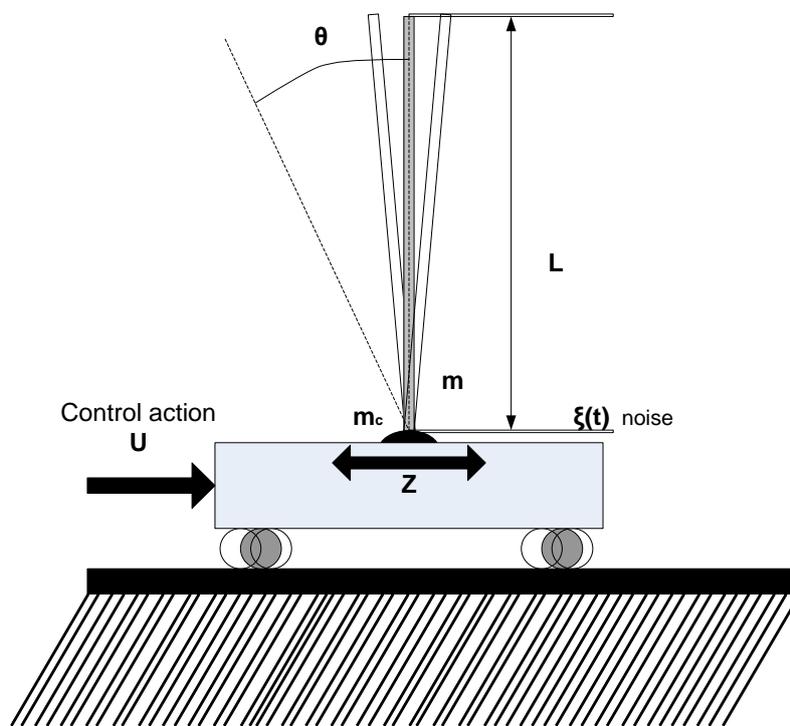


Рис. 5. Динамическая система «движущаяся каретка – перевернутый маятник»

Динамическое поведение этой системы при воздействии силы управления  $u$  описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{\gamma \sigma \sin \theta + \chi \sigma \theta \left( \frac{v + \xi(\tau) + \alpha_1 \dot{\zeta} + \alpha_2 \zeta - \mu \lambda \dot{\theta}^2 \sigma \sin \theta}{\mu_\chi + \mu} \right) - \kappa \dot{\theta}}{\lambda \left( \frac{4}{3} - \frac{\mu \chi \sigma^2 \theta}{\mu_\chi + \mu} \right)} \\ \ddot{\zeta} = \frac{v + \xi(\tau) - \alpha_1 \dot{\zeta} - \alpha_2 \zeta + \mu \lambda (\dot{\theta}^2 \sigma \sin \theta - \ddot{\theta} \chi \sigma \theta)}{\mu_\chi + \mu} \end{cases} \tag{2}$$

В системе уравнений (1)  $\zeta$  и  $\theta$  – обобщенные координаты;  $\gamma$  – ускорение свободного падения  $9.8 \text{ m/sec}^2$ ,  $\mu_\chi$  – масса тележки,  $\mu$  – перевернутого маятника (называемого «шест»),  $\lambda$  – половина длины

маятника,  $\kappa$  и  $\alpha_1$  коэффициенты трения в  $\zeta$  и  $\theta$  соответственно,  $\alpha_2$  – сила упругости тележки,  $\xi$  – внешний стохастический шум.

Без управления маятник не может быть удержан в вертикальном положении [6]. Цель управления – сбалансировать положение маятника в условиях существенных ограничений на скорость и положение тележки, а также в условиях ограниченной силы управления. В этом случае для стабилизации необходимо выполнения условия  $\theta = 0$ . Рассмотрим модель динамической системы с параметрами, представленную в табл. 2.

Таблица 2. Параметры системы

Параметры системы					
$\mu_c$ [кг]	$\mu$ [кг]	$\lambda$ [м]	Коэфф. трения в $\theta$ , $\kappa$	Коэфф. трения в $\zeta$ , $\alpha_2$	Сила упругости, $a_1$
1.0	0.1	0.5	0.4	0.1	5.0

и следующими начальными условиями:  $[\theta_0 \dot{\theta}_0] = [100.1](grad)$ ;  $[\zeta_0 \dot{\zeta}_0] = [00]$ . Построим Matlab – модели для выбранных систем управления.

### Проектирование нечеткого ПИД-регулятора в ОБЗ

Для создания нечеткого регулятора в ОБЗ получен обучающий сигнал (ОС) на ситуации с внешними воздействиями (шум с распределением Гаусса). На рис. 6-8 показаны спроектированные с помощью ОБЗ функции принадлежности.

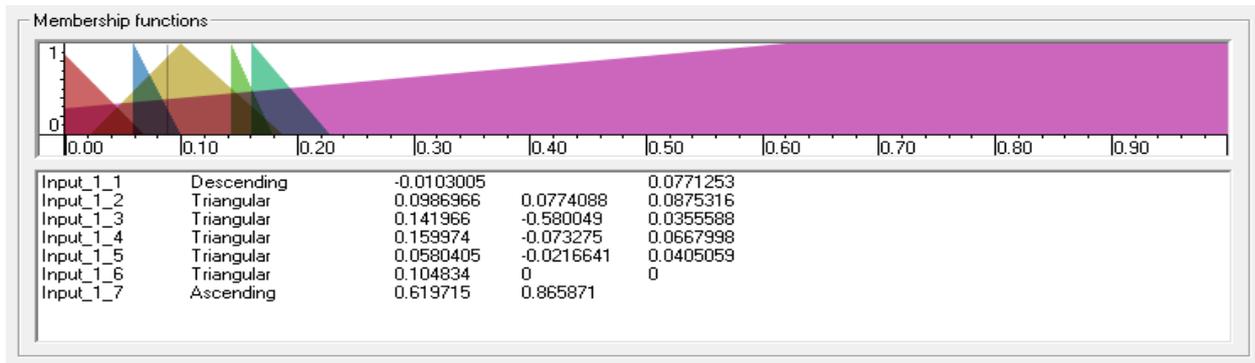


Рис. 6. Функции принадлежности для первой входной переменной

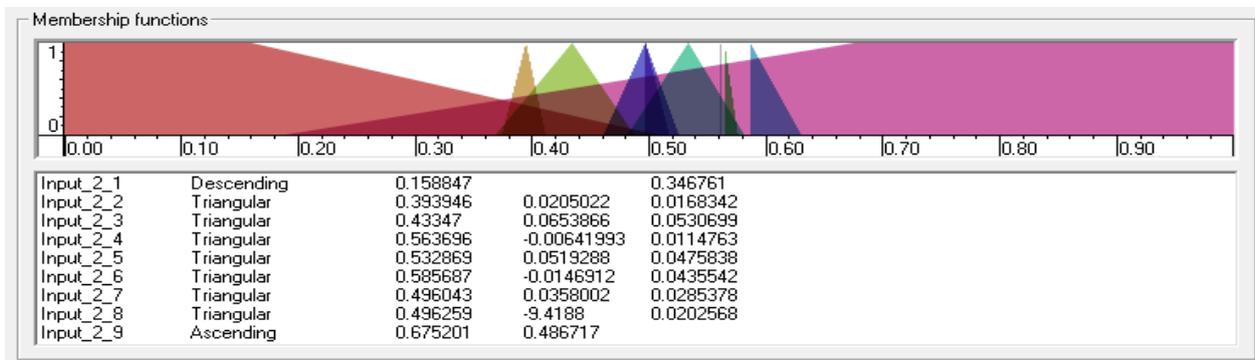


Рис. 7. Функции принадлежности для второй входной переменной

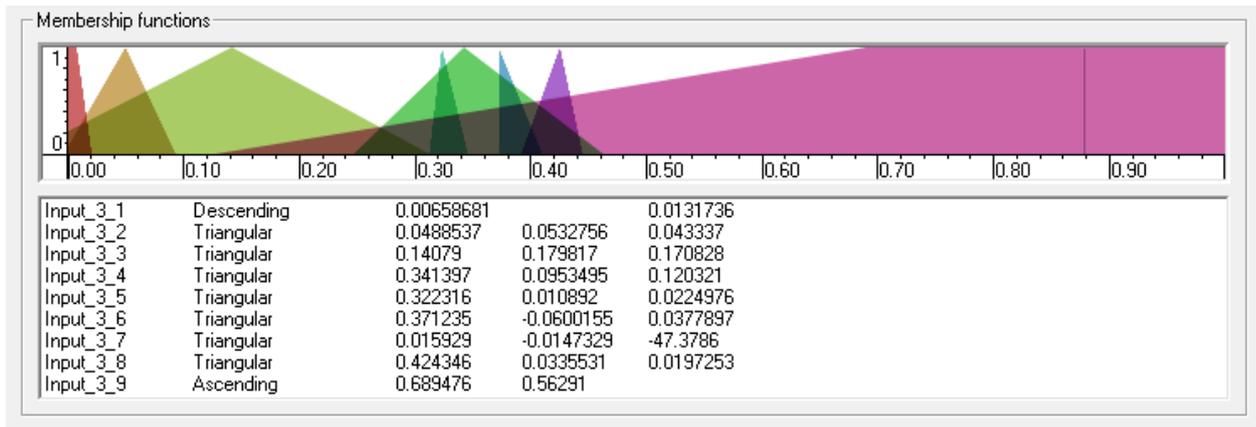


Рис. 8. Функции принадлежности для третьей входной переменной

Построим базу знаний в интеллектуальном инструментарии ОБЗ для скользящего типа управления.

### Проектирование регулятора с СР в ОБЗ

Для создания НР в ОБЗ получен ОС на ситуации с внешними воздействиями (шум с распределением Гаусса). На рис. 9-11 показаны спроектированные с помощью ОБЗ функции принадлежности [7, 8].

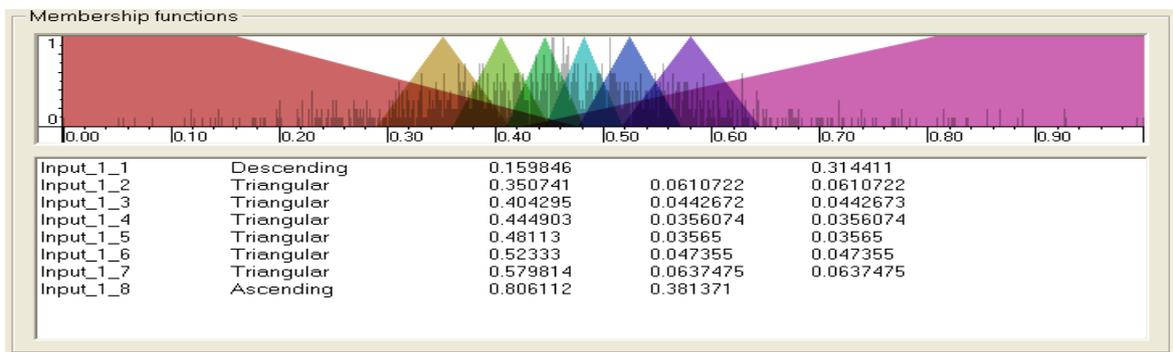


Рис. 9. Функции принадлежности для входной переменной S

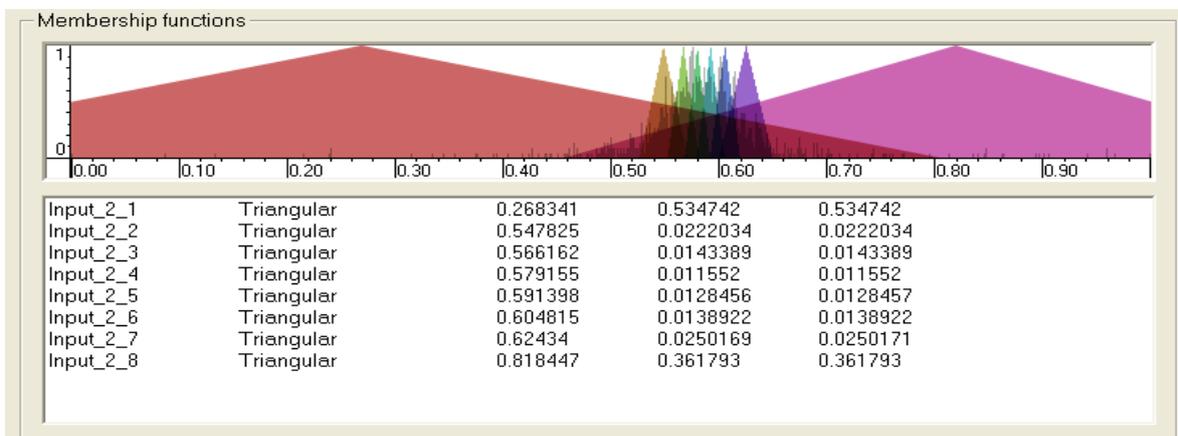


Рис. 10. Функции принадлежности для входной переменной dS

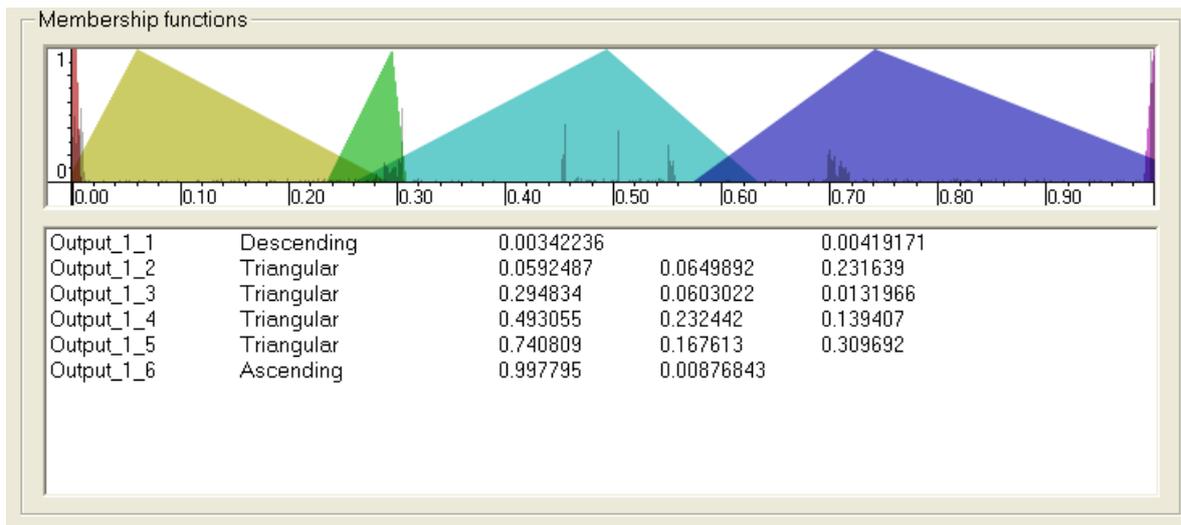


Рис. 11. Функции принадлежности для выходной переменной U

### Сравнение результатов моделирования

Будем рассматривать модель динамической системы с параметрами, представленными в табл. 3.

Таблица 3. Параметры системы

Параметры системы					
$\mu_c$ [кг]	$\mu$ [кг]	$\lambda$ [м]	Коефф. трения в $\theta, \kappa$	Коефф. трения в $\zeta, \alpha_2$	Сила упругости, $a_1$
1.0	0.1	0.5	0.4	0.1	5.0

и следующими начальными условиями:  $[\theta_0 \dot{\theta}_0] = [100.1](grad); [\zeta_0 \dot{\zeta}_0] = [00]$ . Весовой параметр  $w = 5.9$ .

### Непредвиденная ситуация 1

Шум Гаусса (максимальная амплитуда = 2); Задающий сигнал = 0.

Сравнение работы регуляторов (скользящий режим и ПИД-коэффициенты) в непредвиденной ситуации 1 (рис. 12-15)

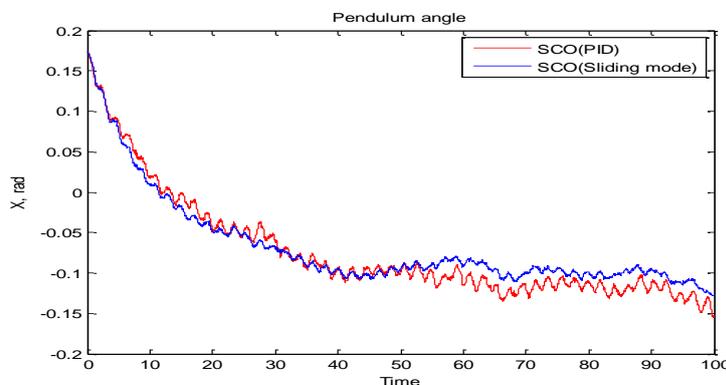


Рис. 12. Изменение угла маятника

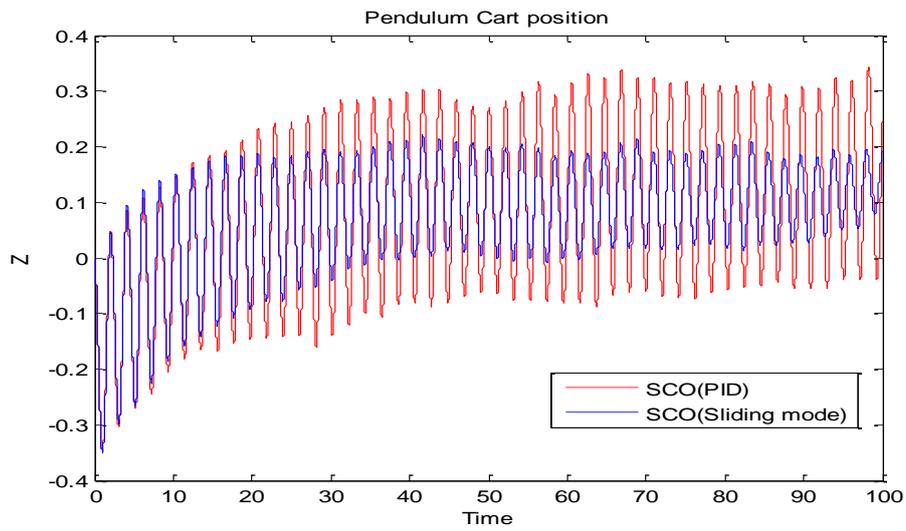


Рис. 13. Изменение положения каретки

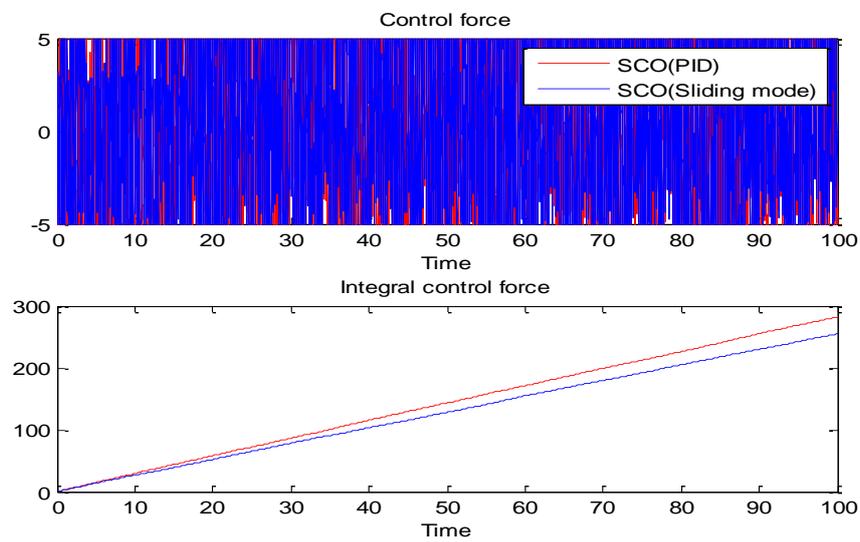


Рис. 14. Изменение силы управления

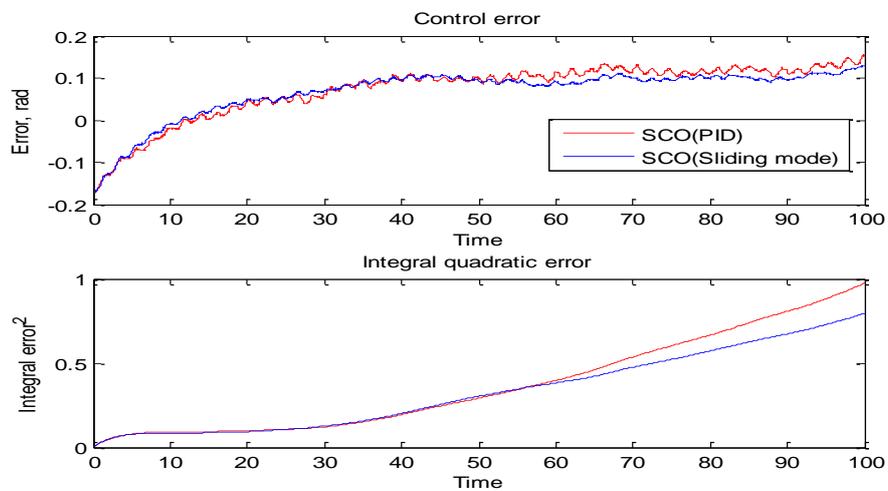


Рис. 15. Изменение ошибки управления и интегральной квадратичной ошибки управления

## Непредвиденная ситуация 2

Шум Гаусса (максимальная амплитуда = 2,5); задержка в каналах измерения = 0.001; задающий сигнал = 0.

Сравнение работы регуляторов (СР и ПИД-коэффициенты) в непредвиденной ситуации 2 (рис. 16-19).

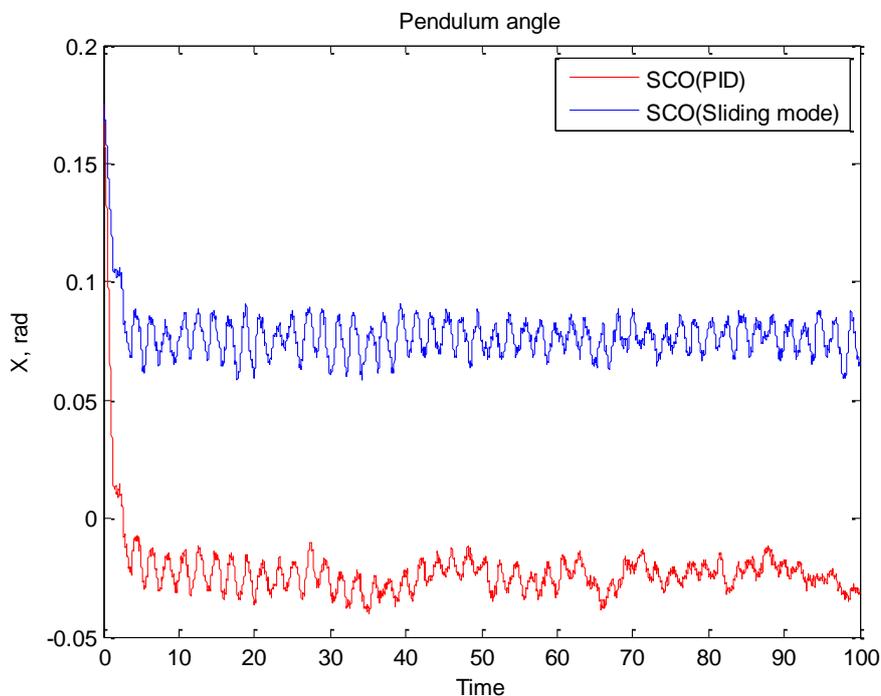


Рис. 16. Изменение угла маятника

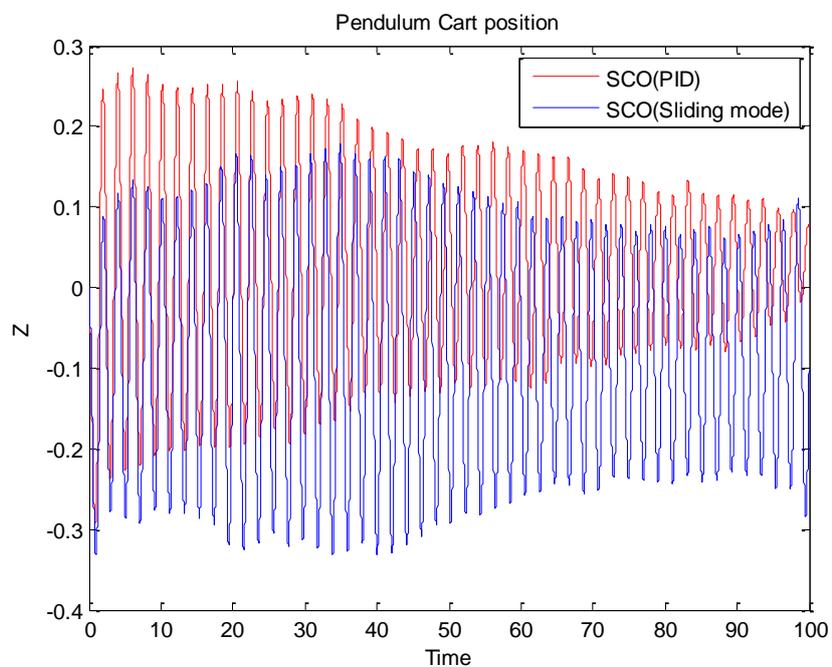


Рис. 17. Изменение положения каретки

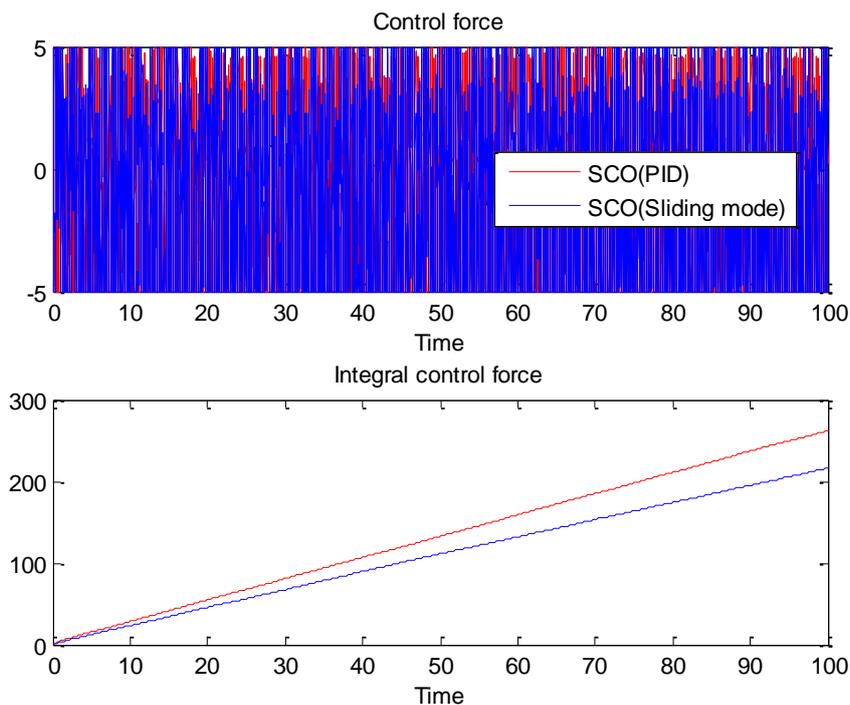


Рис. 18. Изменение силы управления

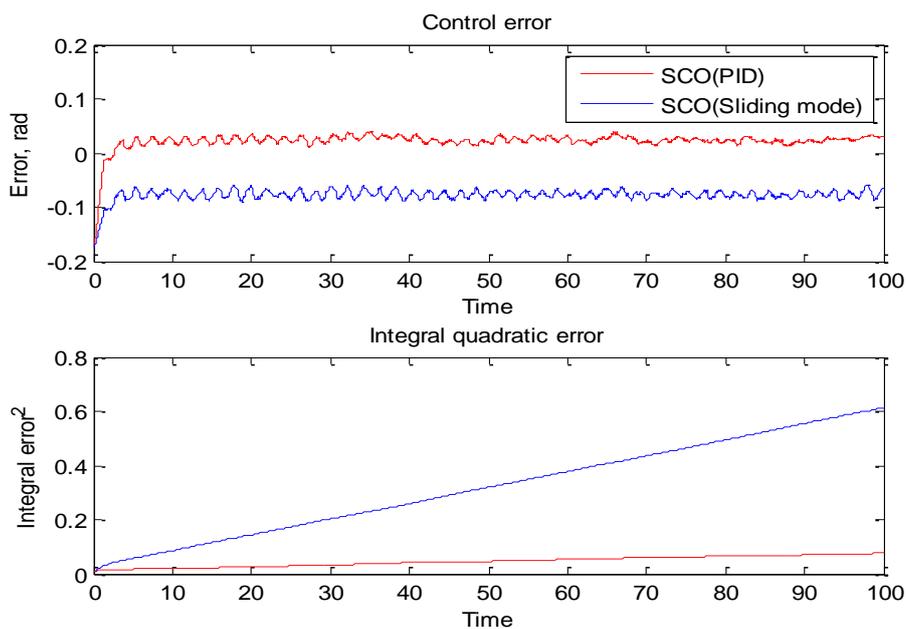


Рис. 19. Изменение ошибки управления и интегральной квадратичной ошибки управления

### Вывод

Из представленных результатов видно, что БЗ, спроектированные в ОБЗ, справляются с целью управления, причем в одном случае лучше использовать скользящий режим управления, а в другом, на ПИД-управлении.

## Заключение

В этой статье показано сравнение двух типов управления – нечеткого скользящего типа управления и нечеткого ПИД-управления. Показана интеллектуальная структура обеих систем управления. Проведено сравнение, которое показало, что оба типа управления являются эффективными и способны достигать цели управления даже в непредвиденных ситуациях управления. Стоит отметить, что тип управления с СР в одном из случаев является менее эффективным, чем другой и достигает цели управления, но ресурса управления требует меньше, что может оказаться привлекательным для систем, которые не обладают мощным ресурсом управления.

Проектирование робастных ИСУ на основе такого подхода требует минимума исходной информации, как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях. Таким образом, новый разработанный инструментальный ОБЗ может строить робастные интеллектуальные системы управления, способные функционировать на множестве как обучающих (типовых), так и новых (непредвиденных) ситуаций управления для систем, использующих скользящий режим управления.

## Список литературы

1. Utkin V. I. First Stage of VSS: people and events // Lecture Notes in Control and Information Science, X. Yu and J.-X. Xu, Eds. London, U.K.: Springer-Verlag, 2002. – Vol. 274. Variable Structure Systems: Towards the 21st Century. – Pp. 1-33.
2. Utkin V. I. Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems. – Moscow, Russia: Mir Publishers, 1978.
3. Young K. D., Utkin V. I., and Ozguner U. A control engineer's guide to sliding mode control // IEEE Trans. Control Syst. Technol. – May 1999. – Vol. 7. – №3. – Pp. 328-342.
4. Нефёдов Н.Ю., Ульянов С.В. Нечеткий регулятор со скользящим режимом на основе мягких вычислений: сравнение с инструментарием FIS и ANFIS // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2013. – №1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://sanse.ru/download/153>.
5. Ульянов С.В., Мишин А.А., Нефёдов Н.Ю., Петров С.П., Полунин А.С. Методы построения баз знаний для управления нелинейными динамическими системами // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2011. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://sanse.ru/download/85>.
6. Литвинцева Л. В., Ульянов С. В., Ульянов С. С. Построение робастных баз знаний нечётких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. – ТиСУ, 2006. – № 5.
7. Y Li, KH Ang. Patents, software, and hardware for PID control: An overview and analysis of the current art, Control Systems, IEEE, 26 (1). – Pp. 42-54.
8. Liang, Y.-L. et al. Controlling fuel annealer using computational verb PID controllers // Proceedings of the 3rd international conference on Anti-Counterfeiting, security, and identification in communication (IEEE), 2009. – 417-420.